引文格式：陈慧珍,许才顼,梁万新,等. 面向精密工程测量的磁偏角快速测量算法[J]. 地理空间信息, 2026, 24(3): 127-130. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.03.026

面向精密工程测量的磁偏角快速测量算法

陈慧珍[1]，许才顼[2*]，梁万新[1]，陆红艳[1]
（1. 梧州医学高等专科学校 公共教育学院，广西 梧州 543199；
2. 梧州学院 广西机器视觉与智能控制重点实验室，广西 梧州 543002）

摘　要：磁偏角是使用电子罗盘进行航向测量的主要误差之一。受环境和传感器自身等因素影响，各地区的磁偏角真实值波动较大，导致电子罗盘测量航向角的精度难以保障。为提升精密工程测量中惯性传感器的精度，提出了一种GNSS定向与罗盘测向相结合的磁偏角快速测量算法。首先通过高精度大地坐标计算真北方位角和电子罗盘解算磁北方位角，建立基于多尺度解算结果的磁偏角估算模型；再借助最小二乘法磁场校正强化磁方位角计算对复杂环境的适应性；最后融合多个特定方位数据进行磁偏角精准解算。实验测试结果表明，该算法计算的各方位磁偏角数据基本稳定，校正后的倾斜补偿算法取得0.03 m的坐标改正精度；该算法在任意测量环境中均能快速、有效、准确的测量磁偏角。

关键词：磁偏角计算；误差校正；精密工程测量；倾斜测量；惯性导航
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）03-0127-04

Rapid Magnetic Declination Measurement Algorithm for Precision Engineering Measurement

CHEN Huizhen[1], XU Caixu[2], LIANG Wanxin[1], LU Hongyan[1]
(1. Department of Public Education, Wuzhou Medical College, Wuzhou 543199, China;
2. Key Laboratory of Machine Vision and Intelligent Control, Wuzhou University, Wuzhou 543002, China)

Abstract: Magnetic declination is one of the main errors of heading angle measurement by electronic compass. Influenced by factors such as environment and sensor itself, the true value of magnetic declination fluctuates greatly in various regions, leading it difficult to ensure the accuracy of heading angle measurement using electronic compass. In this study, a rapid measurement algorithm for magnetic declination by combining GNSS orientation and compass direction measurement was proposed to improve the accuracy of inertial sensors in precision engineering measurements. Firstly, the true north azimuth and the magnetic north azimuth were calculated via high-precision geodetic coordinate electronic compass respectively. Then, based on the fusion of multi-scale results, a magnetic declination estimation model was established, and the adaptability of magnetic azimuth calculation to complex environments was strengthened with the help of least squares magnetic field correction. Finally, multiple specific azimuth data was fused for accurate magnetic declination calculation. The experimental test results show that the magnetic declination data calculated by this algorithm is basically stable in all directions. After the magnetic declination correction, the oblique compensation algorithm calculated by this algorithm achieves a coordinate correction accuracy of 0.03 m. This algorithm can measure the local magnetic declination quickly, effectively and accurately in any measurement environment.

Key words: magnetic declination calculation, error correction, precision engineering measurement, oblique photogrammetry, inertial navigation

地磁导航具有全天时、全天候、全地域、低能耗、高可靠性的特点[1]，因此磁罗盘作为低成本的导航工具被广泛应用于航空航天、测绘导航、资源勘探、地球科学研究等领域。磁偏角是磁罗盘定向应用的主要误差之一，是地磁场强度矢量水平观测方位角与正北方位角之间的偏差，对于提升地磁导航应用的精度具有重要意义。如何有效测量与消除实际应用场景中电子罗盘磁偏角，进而稳定电子罗盘的测量精度成为当前地磁惯性导航热门研究问题[2-3]。国内外学者围绕磁偏角测量开展了大量研究[4-14]。为能有效提升精密工程测量应用中磁罗盘的测量精度，尽可能减少磁偏角误差对姿态测量和倾斜测量的影响，本文以高精

项目来源：梧州市科技计划资助项目（2023A05036、2023A05039）；梧州医学高等专科学校校级科研资助项目（24WYZD03、23WYKY09）。
第一作者简介：陈慧珍（1993—），硕士，工程师，主要研究方向为工程测绘、高精度GNSS导航应用、数据可视化，E-mail：3085349530@qq.com。
通信作者：许才顼（1991—），硕士，讲师，工程师，主要研究方向为工程测绘、GNSS应用、地理信息系统、软件工程，E-mail：792007119@qq.com。

度惯性导航GNSS接收机为基础，通过采集统一尺度的真北方位角和磁北方位角观测值，利用各计算数据间的数学关系构建磁北角、真北角和磁偏角的等价代数转化模型，实现了实地快速磁偏角测量。通过实地测试与分析，验证了本文方法的可行性与鲁棒性。

1 理论基础

磁偏角[15]是地磁轴与地理南北极之间形成的一个不稳定夹角，不同地点的磁偏角大小存在较强的不确定性且易受地理环境影响。地磁场特性可通过磁场强度、磁偏角、磁倾角来描述[16]。磁场强度（B）描述磁场大小，分为磁场水平分量和垂直分量；磁偏角（D）描述地磁水平分量与地理真北方向之间的夹角；磁倾角（I）为地球表面磁场矢量方向与水平面之间的夹角。根据右手法则，地磁场数学模型见图1。

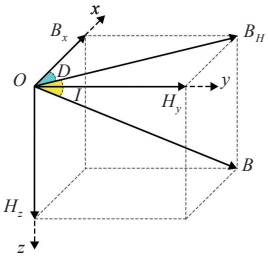


图1 磁场三要素数学模型

目前常用的地磁场模型为国际地球参考场模型（IGRF）和世界地磁场模型[17]（WMM），主要由国际地磁与航空学协会、美国国家海洋和大气管理局的环境信息中心和英国地质调查局等境外机构所研制，每隔5年进行一次模型更新。通过美国国家海洋和大气管理局环境信息中心官网下载的应用程序，结合地球任意一点经纬度和大地高程，即可直接计算出当地磁偏角等相关地磁参数信息[18]。在实际测量应用中，高精度GNSS接收机可采集并计算获得地理坐标，因此可利用测量的多个磁北方位角和地理坐标计算的真北方向角，得到真实的磁偏角。

2 技术路线

本文围绕融合磁力计数据的GNSS接收机磁偏角快速测量展开，首先通过对GNSS原始观测数据与IMU进行预处理，解算GNSS大地坐标并转换为高斯平面坐标，利用平面向量法计算真北方位角，同时融合磁力计与IMU数据求解载体姿态角及磁北方位角；然后在45°、135°、225°、315°四个方位执行磁偏角采样，通过方位间差值<3°且极差≤3°的双阈值校验机制保障数据的一致性，并采用自适应异常值剔除策略进行磁偏角的精算与估值；最终结合WMM2020模型与GNSS-RTK倾斜测量算法进行残差验证，以平面坐标偏差<0.1 m为精度判据输出磁偏角。

2.1 真北角的计算

根据我国的实际地理情况，为建立地形图测量与城市、矿山等区域性测量控制，通常工程测量应用将高精度GNSS接收机采集的（经度、纬度、高程）大地坐标转换为高斯—克吕格平面直角坐标系的（北、东、地）平面坐标后进行相关测绘工作。为有效降低投影误差和减少坐标转换工作量，通常将地球椭球面以经差相等的子午线划分为若干投影地形带，并以中央子午线和赤道面的交点 O 为坐标原点，根据平面三角函数之间的关系，在高斯平面坐标系中两个坐标点 $A(x_a,y_a)$ 和 $B(x_b,y_b)$ 组成向量相对于水平方向夹角 β 即为真实地理方位角（图2）。其数学表达式为：

$$\beta=\arctan\left(\frac{y_b-y_a}{x_b-x_a}\right) \tag{1}$$

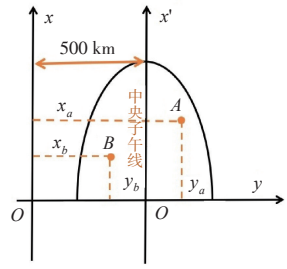


图2 高斯平面直角坐标系

2.2 磁北角的计算

当测地型GNSS接收机集成的磁力计处于理想水平状态时，其 X、Y 轴的输出即为地磁场水平分量和磁北角 ϕ。实际应用中加速度计3个感应轴数据acc_x、acc_y、acc_z 与载体姿态角中的横滚角 θ 和俯仰角 γ 之间的特定数学关系为：

$$\begin{cases}\gamma=a\cos(\text{acc_}y,\text{acc_}z)\\ \theta=a\sin(\text{acc_}x)\end{cases} \tag{2}$$

磁力计处于绝对水平状态下水平分量 H_x、H_y 与实际传感器输出值 M_x、M_y、M_z 之间的特定数学关系为：

$$\begin{cases}H_x=M_x\cos\gamma+M_y\sin\gamma\sin\theta+M_z\sin\gamma\cos\theta\\ H_y=M_y\cos\theta-M_z\sin\theta\end{cases} \tag{3}$$

磁北角可通过反三角函数转换求得：

$$\Phi=\arctan(-H_y,H_x) \tag{4}$$

在实际工程应用中，可利用GNSS接收机中的RTK定位模块实时获取采集点的地理坐标，并将相关坐标转化为地理方位角。同时，GNSS接收机中集成的加速度计、磁传感器等微传感单元能测量并计算横滚角、俯仰角、磁北方位角等姿态角。结合本文算法原

理，即可完成任意实际工程应用场景的实地磁偏角估算。

3　实验分析

在精密工程测量中，磁偏角的快速测量与磁北角、真北角的计算正相关，磁北角与真北角的计算精度能直接反映磁偏角的测量性能。为有效验证磁偏角快速测量算法的可行性，本文选取四面环山的田径场作为数据验证对象（图3），田径场周围地形复杂，且包括高压线网等环境干扰项。通过实地采集的若干组毫米级精度的基准中心点坐标、多方位倾斜点坐标及其对应的姿态角数据，计算得到采样点的磁偏角结果，进而将磁偏角数据用于姿态角误差改正和倾斜点与中心点之间的平面坐标的倾斜补偿，最终通过实验数据验证本文磁偏角快速测量算法的适用性、准确性和鲁棒性。



图3　算法验证环境与采集现场图

3.1　磁偏角计算结果

由于测地型GNSS接收采集的地理坐标的位置精度可达毫米级，因此基于中心基准点的坐标数据，结合观测45°、135°、225°、315°四个方位的数据计算各采样方向观测点的真北角，并与GNSS接收机IMU模块计算的磁北角求差后得到每个采样点的磁偏角。以地理环境相对复杂的梧州学院田径场为采样观测点，各方向采样点的磁北角、真北角计算数据和磁偏角变化曲线见图4、5。

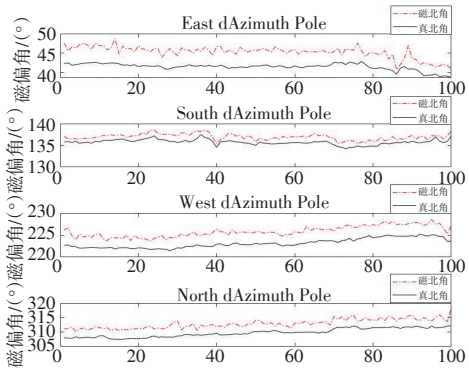


图4　各方位采样点的磁北角、真北角变化曲线

田径场实验地点的地理坐标为(111.309734, 23.501025, 28.57)，数据采集时间为2022年10月4日17点04分。借助于标准WMM2020模型的计算接口得

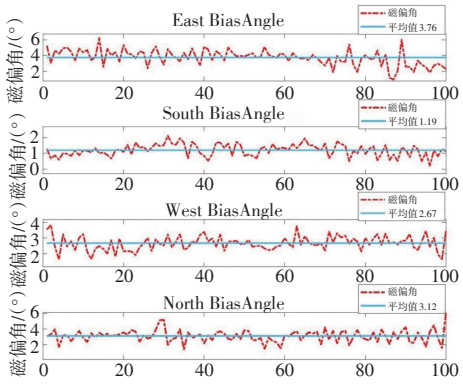


图5　各方向采样点的磁偏角变化曲线

到磁偏角参数为8.25°±0.33°。实地采集磁偏角与WMM2020模型计算的磁偏角之间的偏差见图6，可以看出，各类误差导致实测计算的磁偏角在45°、135°、225°、315°等方向存在偏差，通过磁偏角结果进行了融合与滤波处理，综合估算得到实际测量地点的磁偏角误差为2.69，并将该磁偏角计算值用于磁传感器的罗差校准以及接收机倾斜改正算法的定位误差补偿。梧州学院田径场实测采样点45°、135°、225°、315°方向的真北角、磁方位角、磁偏角结果见表1。

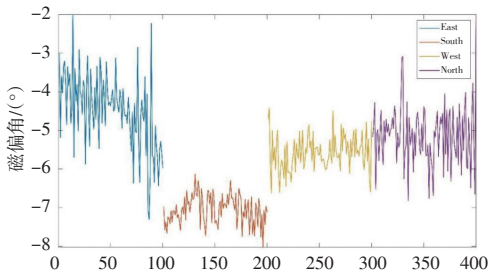


图6　WMM模型计算磁偏角与实测数据计算磁偏角的偏差曲线

表1　各实测方向算术平均值与磁偏角融合结果/(°)

方位	真北角	磁北角	磁偏角
45°	41.559	45.322	3.762
135°	135.745	136.944	1.199
225°	223.140	225.818	2.678
315°	309.770	312.890	3.120

3.2　测量坐标倾斜改正的精度验证

测地型GNSS接收机倾斜测量主要通过横滚角、俯仰角、航向角组成的空间旋转矩阵实现从倾斜观测点到待测地面点的地理坐标倾斜补偿。横滚角、俯仰角、航向角分别由加速度计、磁力计、陀螺仪等传感器数据计算得到，旋转矩阵的航向角通常表示实际地理方位角，而传感器计算得到的航向角即为磁北角。因此，GNSS接收机倾斜测量算法进行倾斜坐标补偿时，地理坐标倾斜补偿精度与方位角精度正相关。利用参考文献[19]描述的倾斜测量算法对45°、135°、225°、315°方位采集的100组倾斜测量数据进行倾斜坐标补偿，实地数据的计算结果表明，本文算法在各

方向上计算得到的真北角、磁北角、磁偏角变化曲线基本稳定。经过本文算法得到的磁偏角改正后的姿态角应用于GNSS接收机倾斜补偿算法，改正坐标点与中心点坐标之间取得0.03 m的误差精度。对比采样中心点坐标后，改正坐标相对于中心点坐标的北向、东向的坐标定位精度见图7。

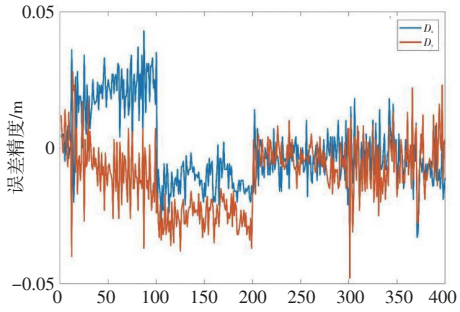


图7 坐标倾斜补偿的平面坐标精度分析

4 结 语

本文研究了面向精密工程测量的磁偏角快速测量问题，提出了一种基于高精度GNSS定向和磁传感器测向的磁偏角实时精准测量算法。首先利用GNSS接收机定位与测姿模块数据，在统一体系下同时换算地理真北角与磁北角数据；再利用多个采样方向数据联合评估最终实地磁偏角，为GNSS接收机惯性导航应用的姿态数据提供了误差校准参考。本文的创新点体现在两个方面：①构建了面向精密工程测量的磁偏角快速计算框架，设计了统一尺度的抗干扰实地磁偏角融合估算模型，通过综合分析多个方位磁场数据，有效应对复杂测量环境，显著提升精密工程测量中电子罗盘的磁偏差校正；②将实地计算的磁偏角数据与主流计算模型进行对比验证，并用于GNSS接收机IMU的误差改正，结果表明结合校正后的IMU数据能有效提升GNSS接收机定位坐标的倾斜补偿精度。本文算法集成度高、操作简便、使用稳定，可提升GNSS接收机倾斜测量算法补偿精度，提高工作效率，具备推广应用价值。然而，该算法仍存在改进空间，计算过程依赖大量数据样本和时间，数据采样效率与计算优化有待提升；在苛刻采样环境下，环境和未知因素易引入噪声，导致计算数据异常、结果波动，采样抗干扰性亟需增强。未来，将围绕提升算法精确度和效率展开研究，并探索将其扩展应用于其他类型惯性导航场景。

参考文献

[1] Gao S Y, Gao H L, You J. In-flight Alignment of Integrated SINS/GPS/Polarization/Geomagnetic Navigation System Based on Federal UKF[J]. Sensors, 2022, 22(16):5985

[2] Androjna A, Belev B. Determining Residual Deviation and Analysis of the Current Use of the Magnetic Compass[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(2):1-14

[3] 乔朝飞，徐坤，孙威，等. 我国政府部门地理信息数据开放：现状、问题及发展建议[J]. 地理空间信息，2023，21(1):1-6

[4] Vitiello F, Causa F, Opromolla R, et al. Onboard and External Magnetic Bias Estimation for UAS Through CDGNSS/Visual Cooperative Navigation[J]. Sensors, 2021, 21(11):3582-3604

[5] 许才顼，周茹彬，贺杰，等. 面向高精度GNSS接收机的惯性传感器误差校准系统[J]. 地理空间信息，2023，21(6):75-78

[6] 薛明. 地籍测绘宅基角点RTK测量精确定位方法研究[J]. 地理空间信息，2022，20(6):113-115

[7] 廖文兵，李东，杨富洲，等. 磁偏角对高精度定位结果的影响[J]. 地理空间信息，2016，14(7):73-74

[8] 任来平，范龙，李凯锋，等. 海岛礁磁偏角测量原理与方法[J]. 海洋测绘，2013，33(5):15-18

[9] 纪立东，张宏伟，邱雪峰，等. MAG-01H地磁经纬仪在静海地磁台的比测数据分析[J]. 测绘地理信息，2017，42(5):50-51

[10] 田晋，任来平，葛忠孝. 地磁偏角测量GPS基准点误差分析[J]. 海洋测绘，2017，37(2):35-38

[11] 张策，滕云田，张涛，等. 自动化磁通门经纬仪测量误差仿真[J]. 地球物理学进展，2019，34(5):1802-1810

[12] 张先韬. 煤矿测井用经纬度获取和磁偏角计算[J]. 矿山测量，2019，47(2):74-78

[13] 陈铭达，车德福. 机场罗盘校正场磁偏角测量方法的研究[J]. 测绘工程，2021，30(6):65-68

[14] 张德会，张捍卫. 机场跑道磁偏角及年变化率测算方法研究与实践[J]. 地理空间信息，2024，22(4):114-116

[15] Silva F O, Paiva L P S, Carvalho G S. Error Analysis of Accelerometr and Magnetometer Based Stationary Alignment[J]. Sensors, 2021, 21(6):2040

[16] Zhang X, Kang X, Chen X, et al. Measurement of Far Field Magnetic Moment Vector of a Moving Ferromagnetic Object[J]. Sensors, 2020, 20(18):10903-10912

[17] 李宏，魏毅博，邹维宝，等. 基于IGRF13和WMM2020模型的地磁匹配特征量的选择[J]. 地球物理学进展，2022，37(4):1414-1421

[18] Chulliat A, Brown W, Alken P, et al. The US/UK World Magnetic Model for 2020-2025[R]. Technical Report, National Centers for Environmental Information, NOAA, 2020

[19] Chen Q J, Lin H, GuoR N, et al. Rapid and Accurate Initial Alignment of the Low-cost MEMS IMU Chip Dedicated for Tilted RTK Receiver[J]. GPS Solutions, 2020, 24(4):119